

*С.Ю.Малков, А.А.Маркова Влияние изменений климата на глобальную демографическую динамику: статистический анализ эмпирических данных // История и синергетика: Математические модели социальной, экономической и культурной динамики / Отв. ред. С.Ю.Малков, А.В.Коротаев. Изд.2-е, испр. и доп. – М.: КомКнига, 2010, с.49-75.*

## **Влияние изменений климата на глобальную демографическую динамику: статистический анализ эмпирических данных**

*Малков С.Ю., Маркова А.А.*

Работа поддержана РФФИ (проект №08-06-00319)

В настоящее время возрастает интерес к глобальным демографическим проблемам, к проблемам изменения климата и его влияния на жизнь людей. В связи с этим повышается значимость исследований, посвященных влиянию природно-климатических факторов на демографическую динамику, социально-экономические процессы.

Сам факт такого влияния никем не оспаривается, однако оценки степени его важности в ряду других факторов у разных авторов сильно расходятся. В связи с этим представляет интерес использование методов статистического анализа имеющихся эмпирических данных для решения этого вопроса.

В исследовании рассматривается доиндустриальная эпоха, когда основой экономики было сельскохозяйственное производство (земледелие и животноводство). Объектом исследования являются аграрные и кочевые общества в период с начала нашей эры до XIX века, ознаменовавшего начало индустриальной эпохи.

Задача исследования состоит в определении степени влияния климатических изменений на глобальные демографические процессы. Проблема заключается в том, что изменение численности населения различных регионов Земли и мира в целом зависит от множества факторов, при этом наиболее ярко проявляются факторы социальной природы:

технологический прогресс, способствующий повышению плодородия почв и увеличению демографической емкости территорий;

внешние завоевания и гражданские войны, нередко приводящие к резкому уменьшению населения и депопуляции;

экологические катастрофы, приводящие к значительному снижению демографической емкости территорий вследствие нерационального землепользования, и др.

Климатические факторы имеют плавный и долговременный характер, поэтому их достаточно сложно выделить на фоне изменчивых факторов социальной природы. Исследование способов такого выделения является предметом данной работы. Они во многом определяются составом и качеством имеющихся исходных данных.

## Исходные данные: климат.

Климатические условия определяются температурой, влажностью, особенностями атмосферных процессов (сезонной циклонической деятельностью) и др. Систематические метеорологические наблюдения стали проводиться с XIX века. Данные о климате в более ранний период имеют косвенный и отрывочный характер (упоминания о природных явлениях в летописях и других исторических источниках, дендрологические и археологические данные и т.п. [1]). При этом, более-менее полные и относительно достоверные данные имеются лишь о температуре.

Анализ глобальных изменений климата обычно проводят на основе данных об изменении среднегодовой температуры приповерхностного слоя воздуха (как правило, для Северного полушария). Результаты реконструкции этих данных за несколько тысяч лет приведены в работах В.В.Клименко [2, 3, 4]. Данные об относительном изменении температуры в Северном полушарии в течение последних полутора тысячелетий приведены на рисунке 1 [2] (за ноль принята среднегодовая температура в период 1951-1980 гг.).

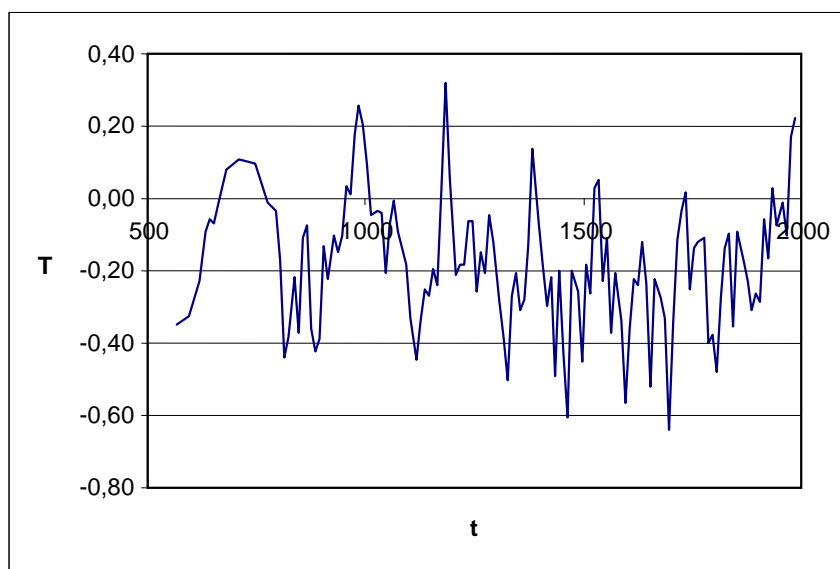


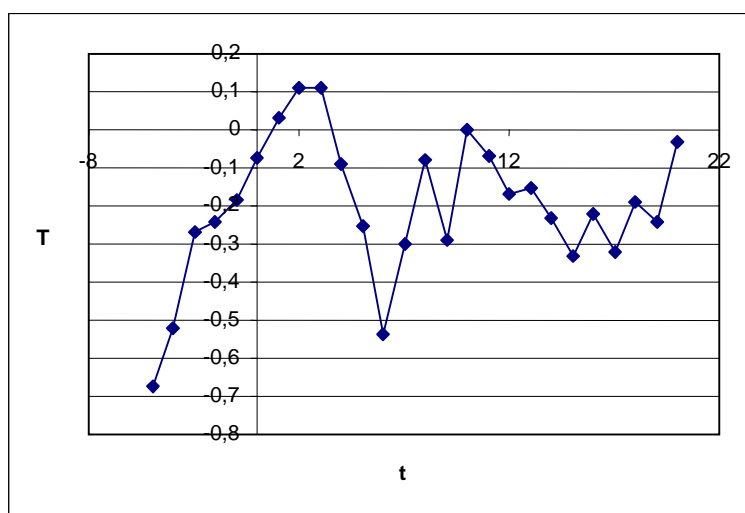
Рисунок 1 – Реконструкция относительного изменения среднегодовой температуры в Северном полушарии [2] (по оси абсцисс – годы, по оси ординат – относительное изменение температуры в градусах Цельсия).

Видно, что для температуры характерны достаточно значительные локальные колебания. Для определения долгосрочных климатических изменений необходимо провести сглаживание данных, например, методом простого скользящего среднего (SMA). Это широко используемый сглаживающий цифровой фильтр, алгоритм которого заключается в следующем [5]: складываются  $N$  последних значений временного ряда и сумма делится на  $N$  ( $N$  принято называть периодом фильтра).

Сложность задачи состоит в выборе оптимального уровня фильтрации данных. Локальные (на масштабе единиц-десятков лет) колебания

среднегодовой температуры слабо влияют на глобальные демографические процессы, хотя и могут привести к серьезным социальным проблемам в отдельных странах (неурожаи, голодные бунты). Для глобальных демографических процессов значимы климатические изменения длительностью не менее 2-3 поколений. Изменения такого масштаба вынуждают аграрные общества искать новые способы землепользования, изменять привычный образ жизни, становятся причиной мощных миграционных процессов (типа Великого переселения народов в первой половине первого тысячелетия нашей эры), глобальных волн завоеваний. При проведении расчетов в качестве периода усреднения (периода фильтра) было выбрано одно столетие.

На [рисунке 2](#) представлены данные о средних температурах по векам (за ноль принята среднегодовая температура в период 1951-1980 гг.), вычисленные с помощью фильтра с периодом 100 лет по данным [\[2, 3\]](#).



**Рисунок 2** – Средние температуры за столетие (по оси абсцисс – столетия, по оси ординат – отклонение от средней температуры середины двадцатого века)

Видно, что в течении нашей эры происходило волнообразное изменение климата: глобальные потепления наблюдались на рубеже тысячелетий, сменяясь глобальными похолоданиями. -

### **Исходные данные: численность населения.**

Основой демографических данных для регионов и для мира в целом являются оценки численности населения в отдельных странах. На [рисунках 3 и 4](#) приведены оценочные данные о динамике численности населения в Китае [\[6\]](#) и Египте [\[7\]](#).

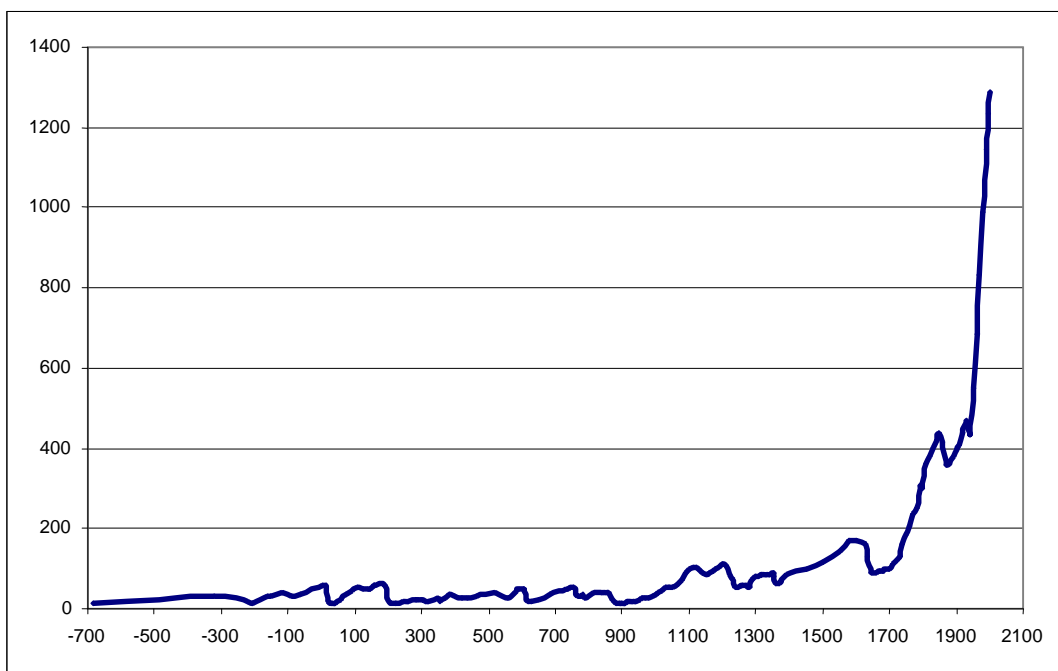


Рисунок 3 - Динамика численности населения в Китае (в млн.чел.) (700 г. до н.э.- 2000 г. н.э.)

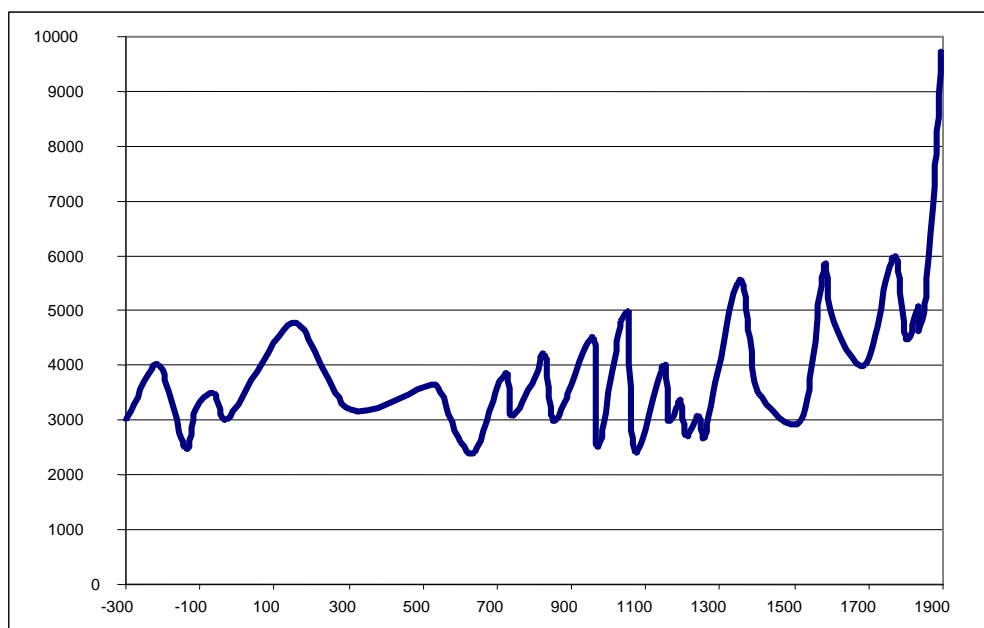


Рисунок 4 - Динамика численности населения в Египте (в тыс. чел.) (300 г. до н.э. - 1900 г. н.э.)

Видно, что с одной стороны, наблюдается общий тренд роста населения в этих странах (особенно после начала индустриальной эпохи), связанный с прогрессом технологий землепользования. С другой стороны, наблюдаются довольно сильные циклические колебания вокруг тренда, обусловленные различными факторами, прежде всего социальными (гражданские войны, завоевания, эпидемии и т.п.). Природа подобных

демографических циклов в аграрных обществах достаточно подробно описана в работах [8, 9, 10, 11].

Рисунки показывают, что выделить влияние климатических факторов на демографические процессы в рамках одной страны очень сложно: слишком велика значимость местных особенностей, внутренних политических и социально-экономических условий. Однако если рассматривать демографическую динамику большого географического региона, то локальные демографические циклы входящих в него стран частично накладываются и компенсируют друг друга. Остаются изменения, которые уже в большей степени связаны с изменением внешних условий, нежели с локальными политическими и социальными процессами. Таким образом, для исследования влияния климатических условий целесообразно рассматривать демографическую динамику крупных территорий.

Наиболее крупным географическим объектом является Земной шар. Для анализа глобальной демографической динамики использовались данные М.Кремера [12], приведенные на рисунке 5.

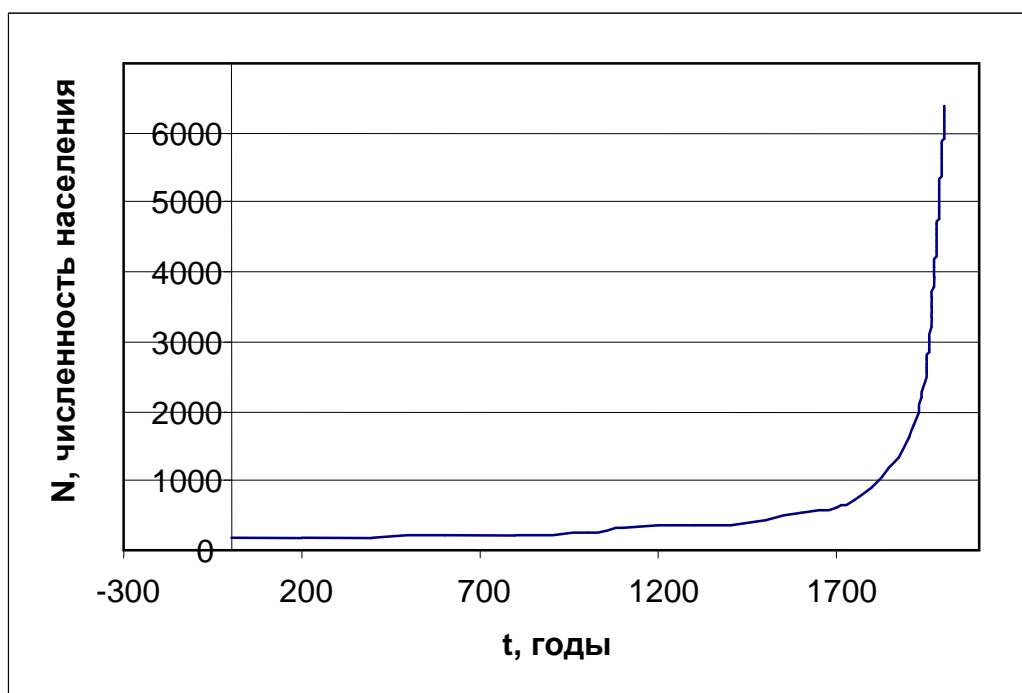


Рисунок 5 – Изменение численности населения Земли на протяжении последних двух тысяч лет (в млн. чел.) [6]

Анализ динамики численности населения Земли показывает, что общий долговременный тренд глобального демографического роста определяется прогрессом в развитии технологий [6], способствующих повышению урожайности, освоению новых сельскохозяйственных культур, выведению новых сортов растений и пород животных и т.п. Климатические изменения являются одним из факторов, обуславливающих колебания вокруг долговременного тренда. Таким образом, сначала необходимо выделить

долговременный тренд в мировой демографической динамике, затем определить локальные отклонения от этого тренда и вычислить корреляцию между этими отклонениями и изменениями среднегодовой температуры Северного полушария. Значение коэффициента корреляции отразит степень влияния климатических факторов на глобальную демографическую динамику.

### Вычисление коэффициентов корреляции

Долговременный тренд роста населения Земли можно аппроксимировать разными функциями. Рассмотрим следующие виды аппроксимирующих кривых: линейную, экспоненциальную и степенную. Результаты расчетов с помощью метода наименьших квадратов представлены на [рисунках 6-8](#), где приведены аппроксимирующие графики и соответствующие коэффициенты детерминации  $R^2$ , отражающие качество аппроксимации [13] ( $R^2$  в данном контексте может рассматриваться как мера соответствия между динамикой, генерируемой математической моделью, и эмпирически наблюдаемой динамикой и интерпретироваться как та доля общей вариации, которая объясняется соответствующей аппроксимирующей функцией).

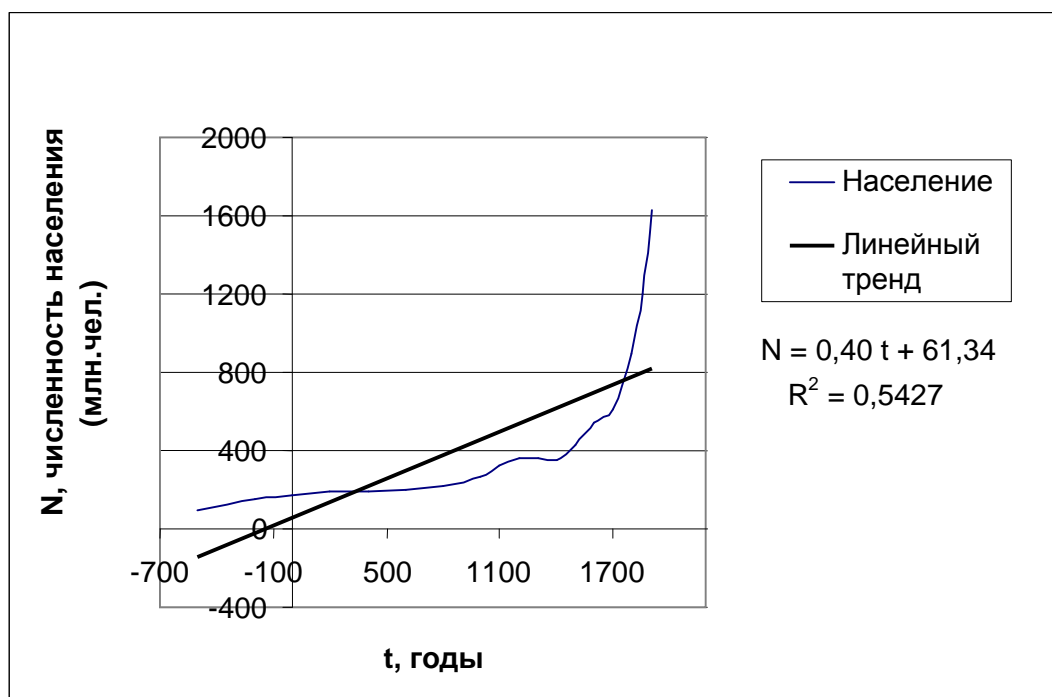


Рисунок 6 - Линейная аппроксимация

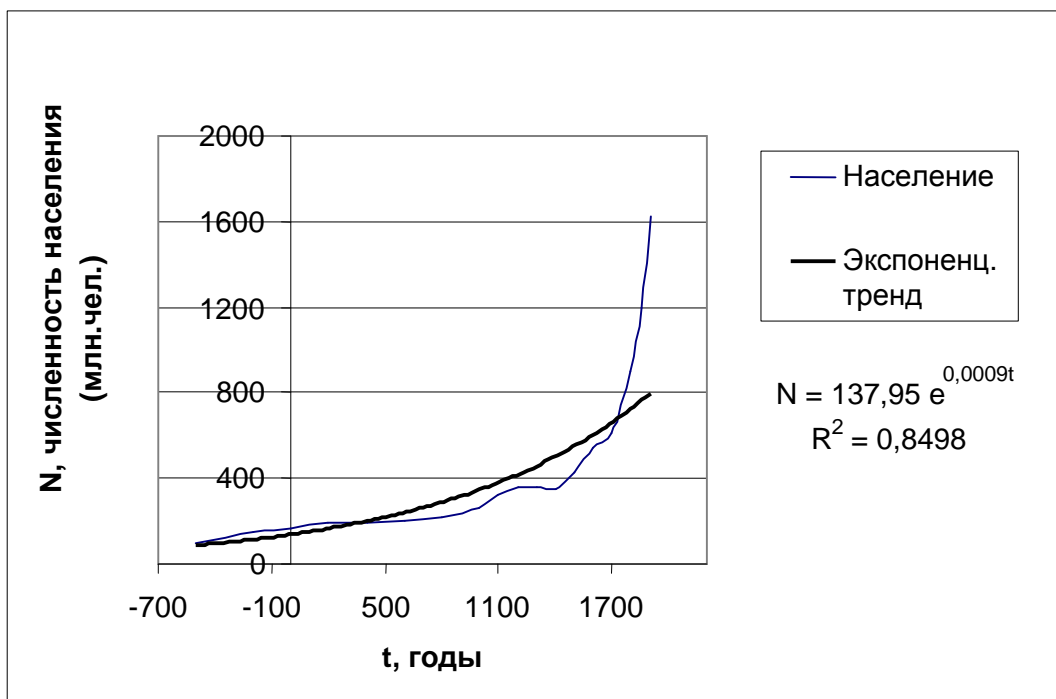


Рисунок 7 - Экспоненциальная аппроксимация

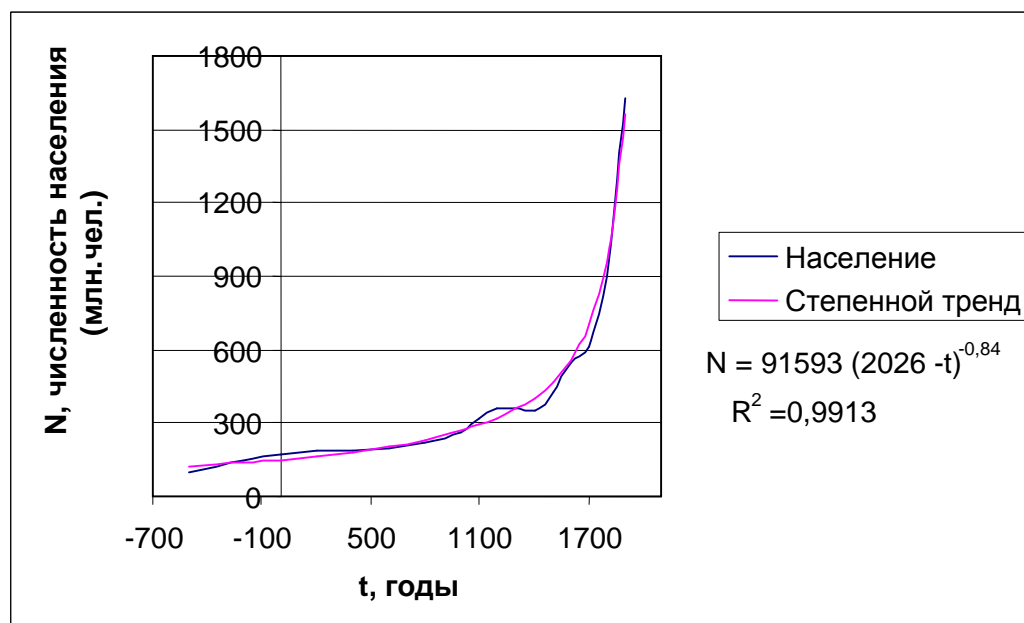


Рисунок 8 - Степенная аппроксимация

Из рисунков видно, что наилучшим образом долговременный рост населения Земли аппроксимируется степенной функцией (коэффициент детерминации  $R^2=0,99$ ). Столь высокая точность аппроксимации долговременного демографического тренда степенной функцией – очень знаменательный факт: он свидетельствует не просто о тенденции, но о наличии строгой закономерности, своеобразного закона, отражающего логику исторического развития (этот факт подробно обсуждается в [6, 14]).

Таким образом, для аппроксимации долговременного демографического тренда целесообразно выбрать степенную функцию и использовать ее для дальнейших вычислений.

Основная идея поставленной задачи - рассмотреть насколько отклоняются реальные данные по народонаселению мира от степенного тренда ( $\frac{N - N'}{N}$ , где  $N$  – численность населения Земли по М.Кремеру,  $N'$  – степенной тренд,  $(N - N')$  – отклонение величины  $N$  от тренда) и сравнить эту величину с изменением глобальной температуры. На [рисунке 9](#) приведены значения отклонения численности населения Земли от степенного тренда  $N'$ , на [рисунке 10](#) - отклонения средней температуры по столетиям от средней величины, на [рисунке 11](#) – график корреляции значений  $\frac{N - N'}{N}$  и  $T$ .

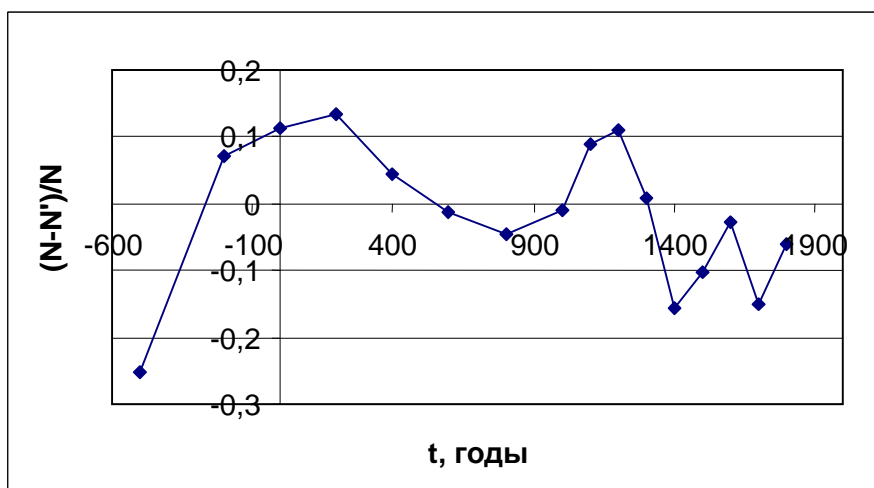


Рисунок 9 - Отклонения численности населения Земли от долговременного тренда

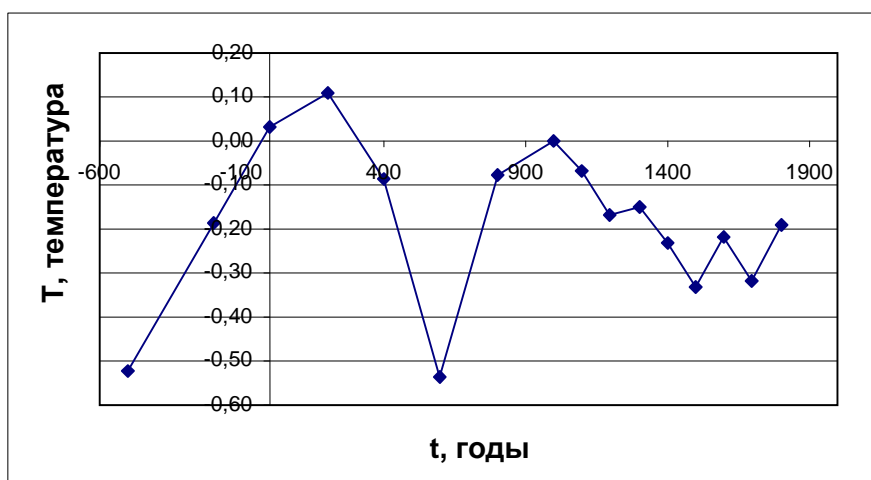
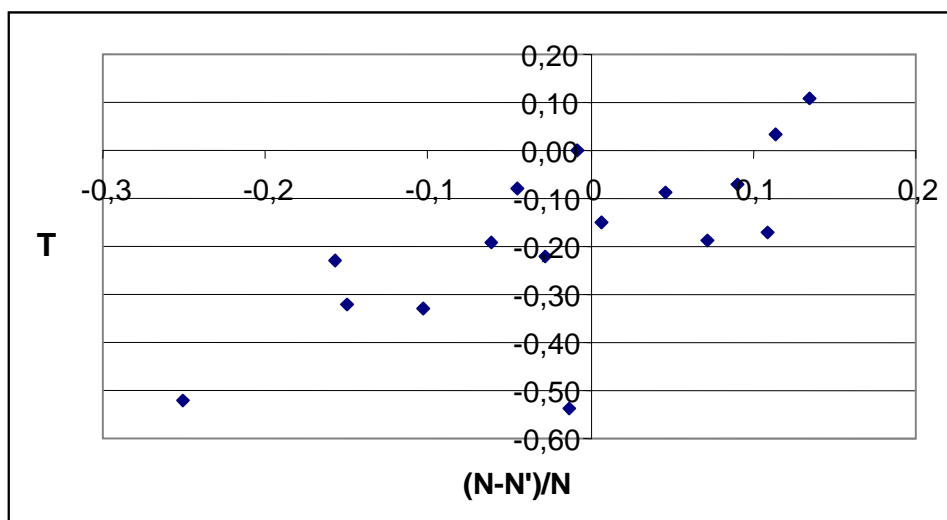


Рисунок 10 – Относительные изменения средней температуры по столетиям



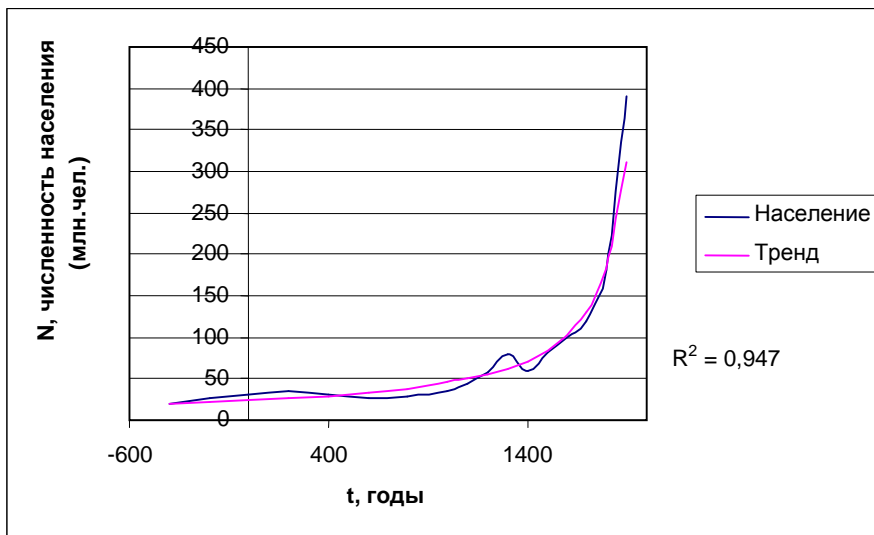


**Рисунок 11** – Корреляционная зависимость между изменением температуры и относительным отклонением численности населения от тренда

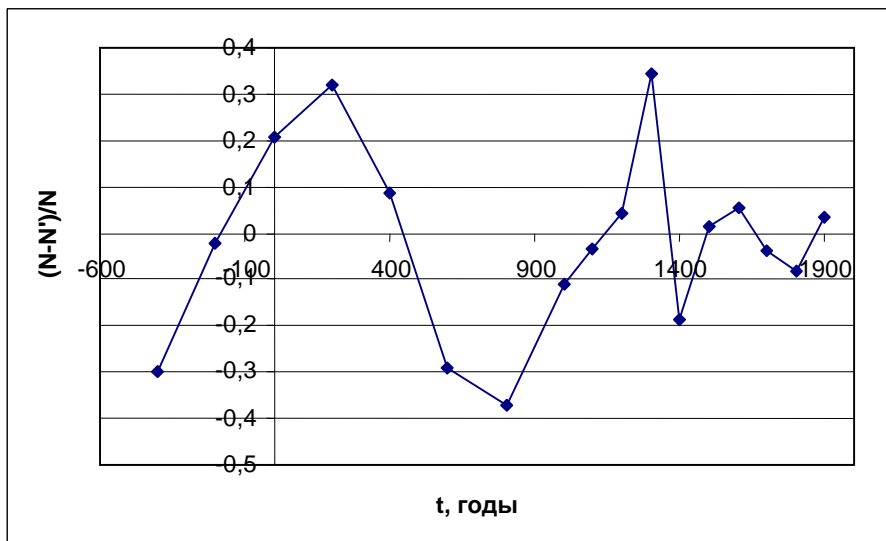
Коэффициент корреляции, полученный в результате вычислений, составляет величину  $r = 0,70$ . Коэффициент корреляции положителен, это свидетельствует о том, что увеличение одной переменной соответствует увеличению другой переменной. Чем ближе коэффициент корреляции к единице, тем сильнее связь между переменными. Полученный коэффициент корреляции имеет высокое значение. Причем, если исключить из рассмотрения данные по VI веку нашей эры, относящиеся к «темным векам» средневековья и обладающие низкой достоверностью, то коэффициент корреляции еще более повышается и достигает значения  $r = 0,82$ . Это позволяет говорить о весьма сильном влиянии изменения климата на мировую демографическую динамику.

Аналогичные расчеты проводились отдельно для различных крупных регионов мира: Европы, Азии, Африки, Китая, Индии (данные по численности населения брались из [15]). Результаты расчетов представлены на [рисунках 12 - 19](#) для каждого из регионов в следующем порядке:

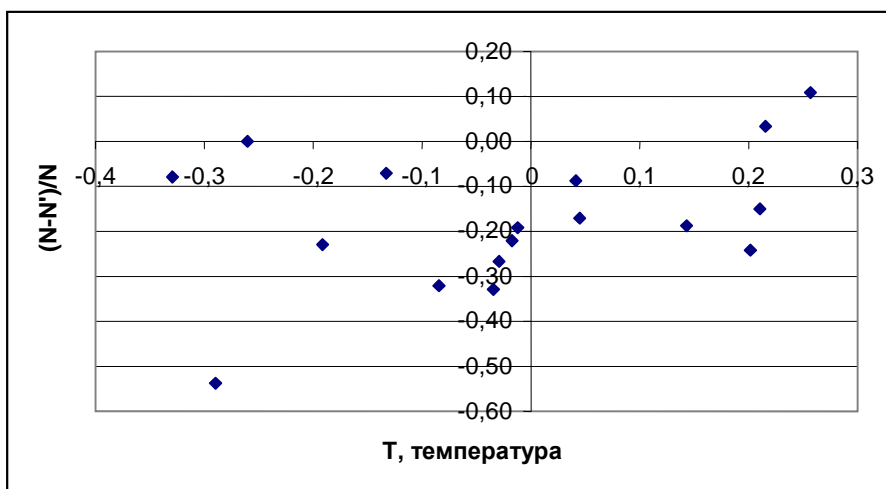
- а) данные о динамике численности населения региона и характеристики соответствующего долговременного тренда;
- б) данные о локальных отклонениях численности населения региона от тренда;
- в) данные о корреляционной зависимости между изменением температуры и относительным отклонением численности населения региона от долговременного тренда.



а) динамика численности населения

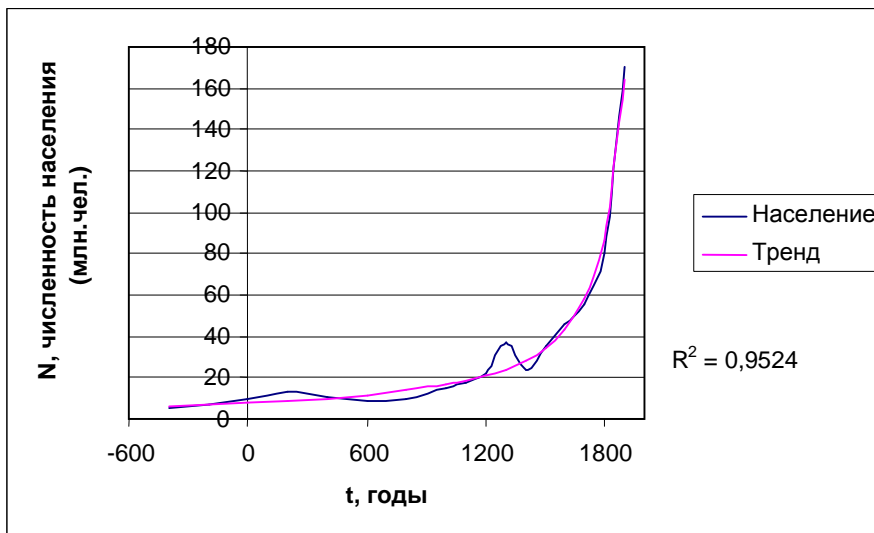


б) отклонения от тренда

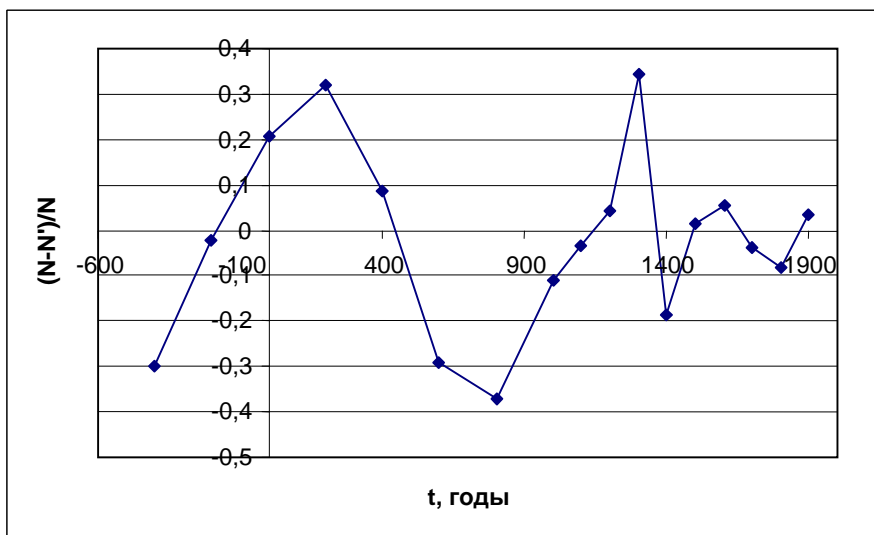


в) корреляция (коэффициент  $r = 0,35$ )

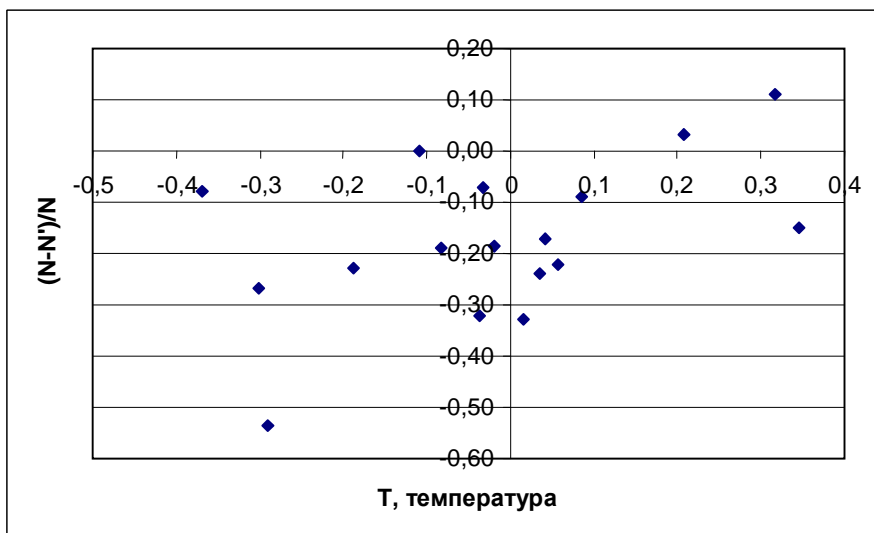
Рисунок 12 – Результаты расчетов для Европы в целом



а) динамика численности населения

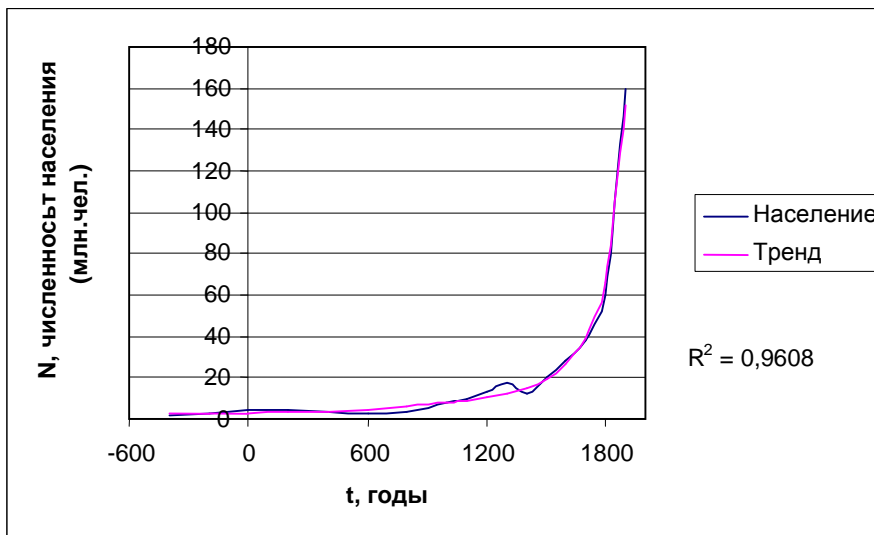


б) отклонения от тренда

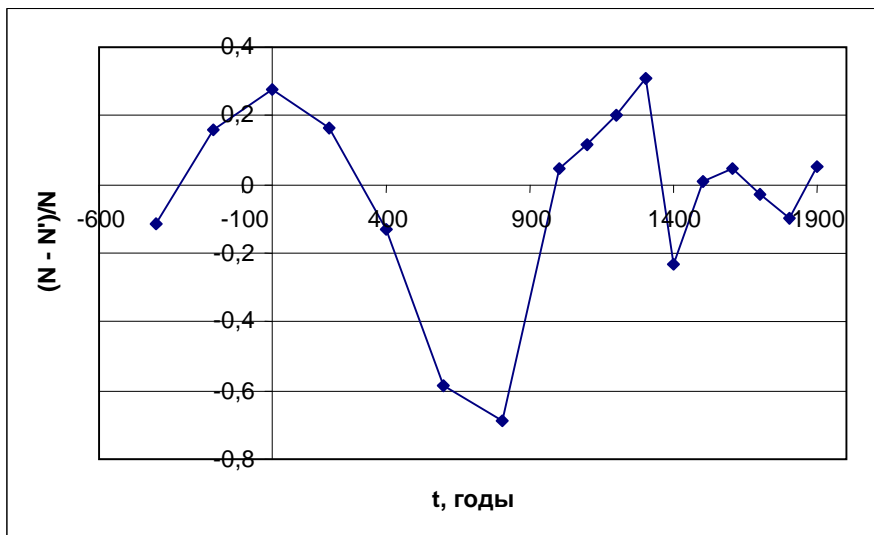


в) корреляция (коэффициент  $r = 0,48$ )

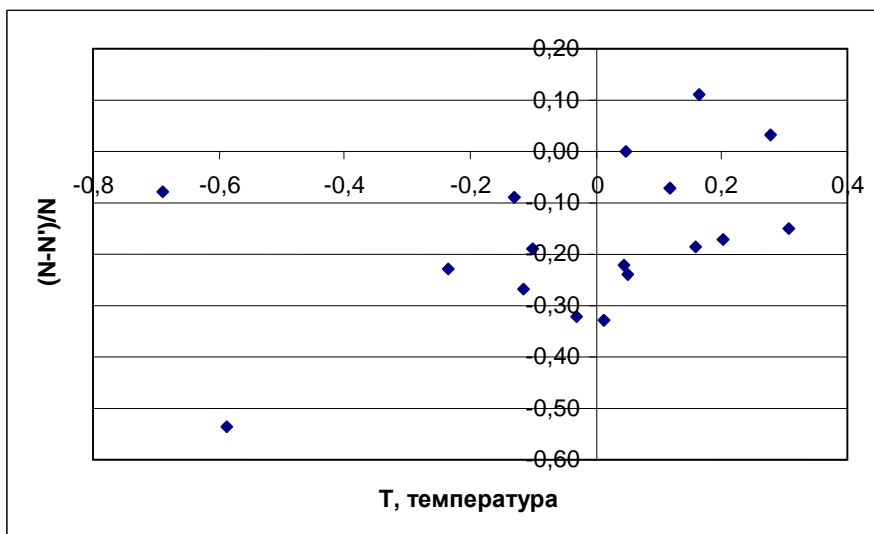
Рисунок 13 – Результаты расчетов для Северо-Западной Европы



а) динамика численности населения

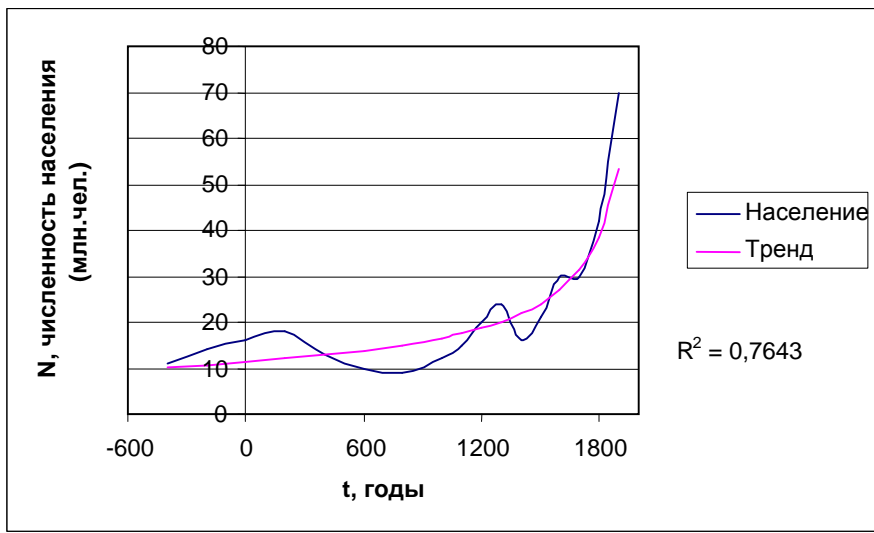


б) отклонения от тренда

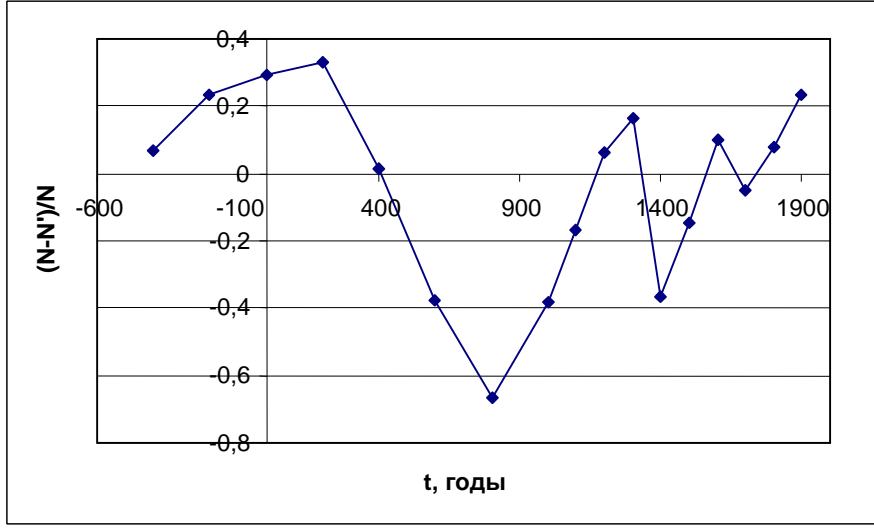


в) корреляция (коэффициент  $r = 0,43$ )

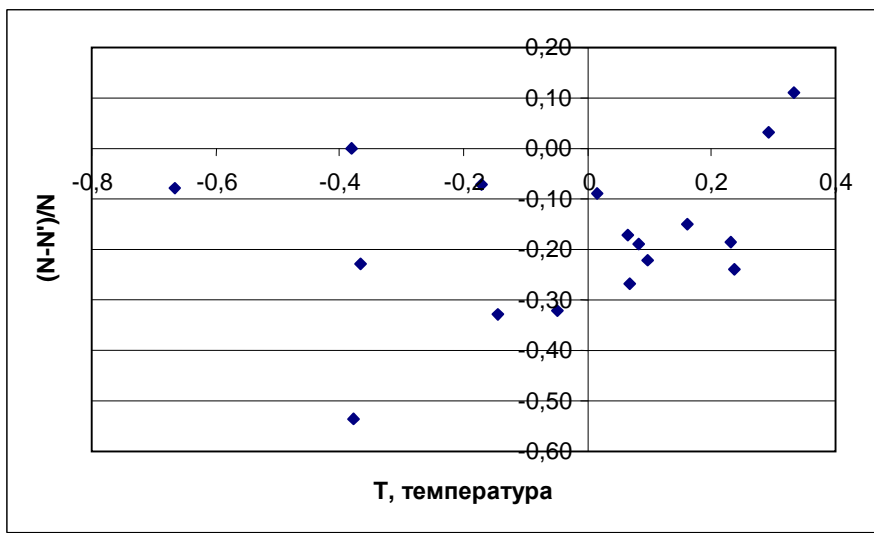
Рисунок 14 – Результаты расчетов для Восточной Европы



а) динамика численности населения

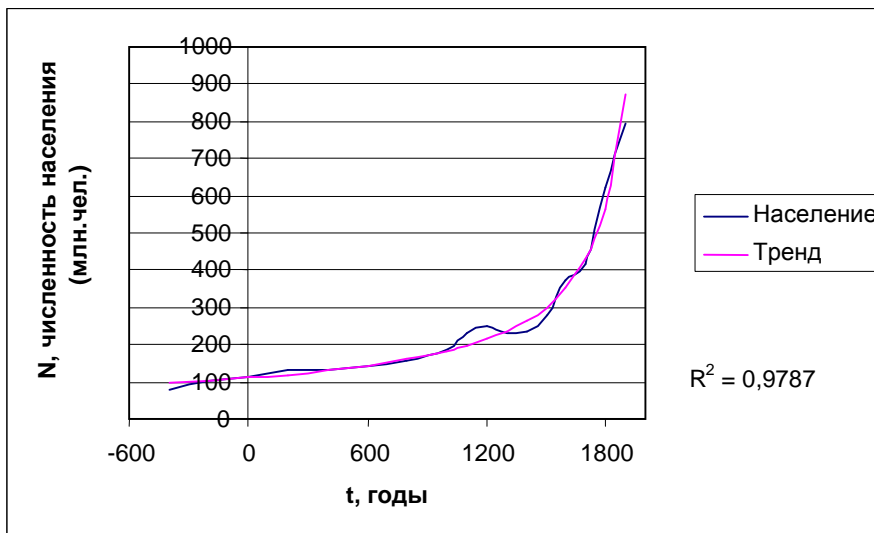


б) отклонения от тренда

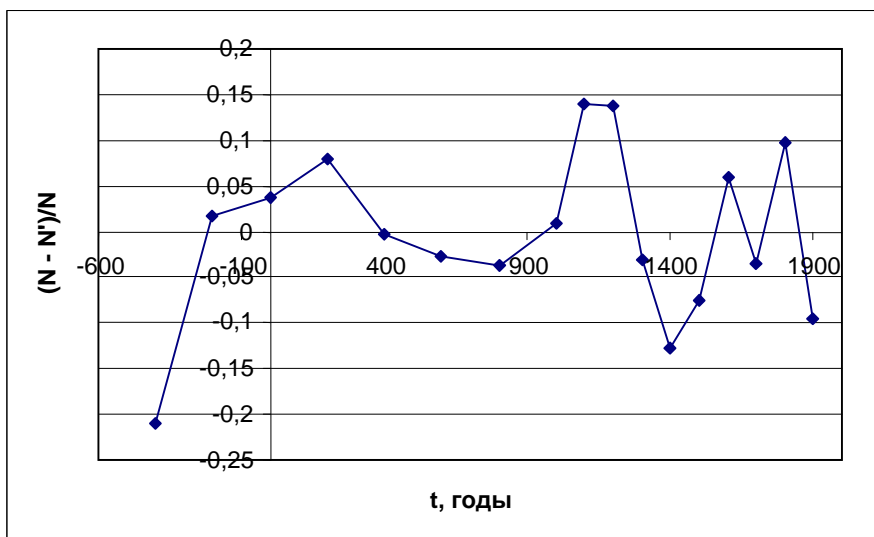


в) корреляция (коэффициент  $r = 0,25$ )

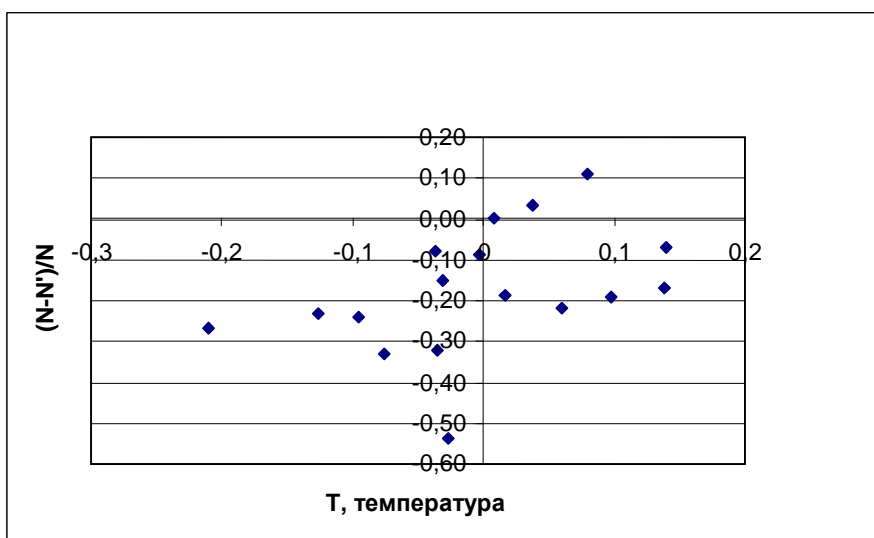
Рисунок 15 – Результаты расчетов для Южной (Средиземноморской) Европы



а) динамика численности населения

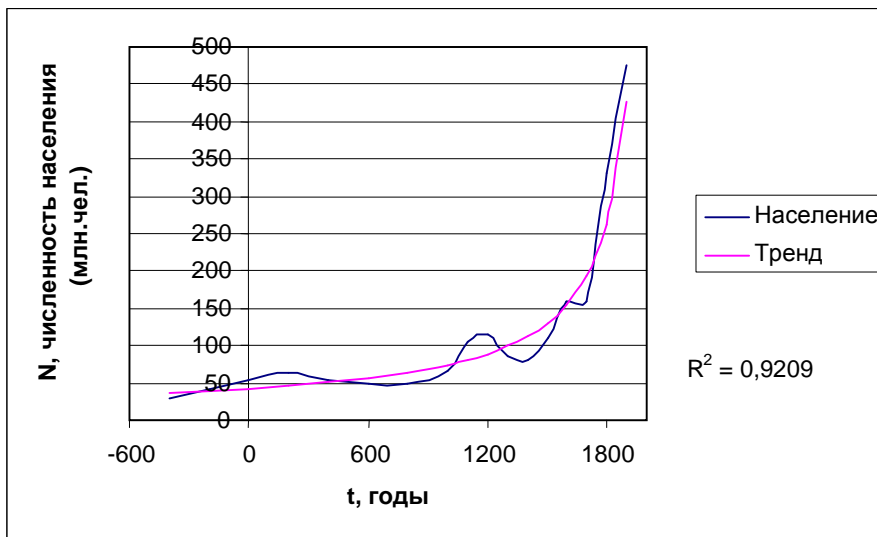


б) отклонения от тренда

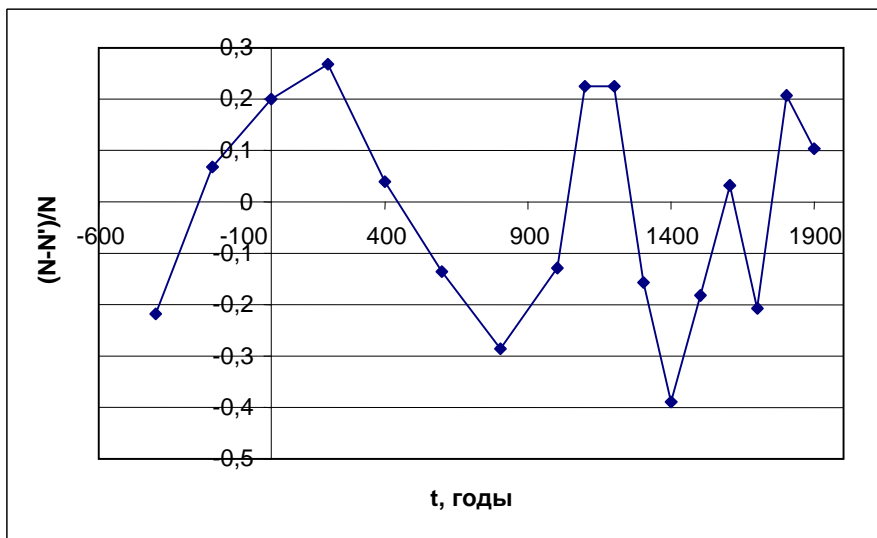


в) корреляция (коэффициент  $r = 0,43$ )

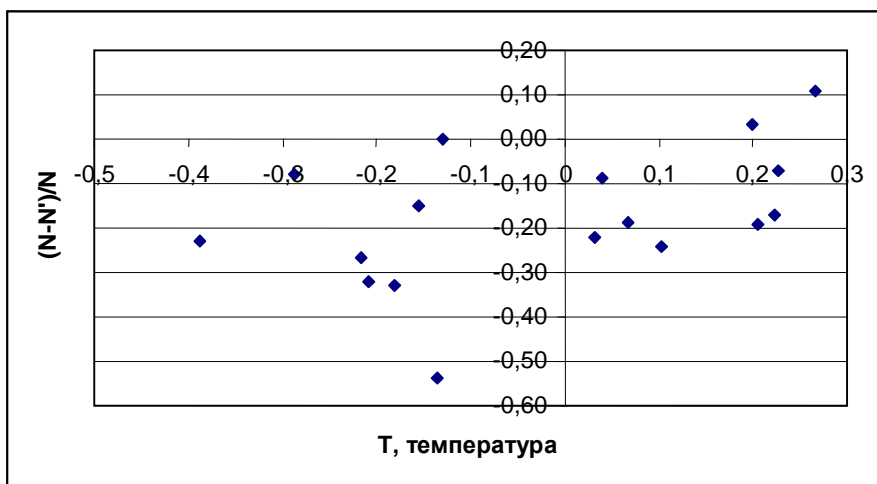
Рисунок 16 – Результаты расчетов для Азии в целом



а) динамика численности населения

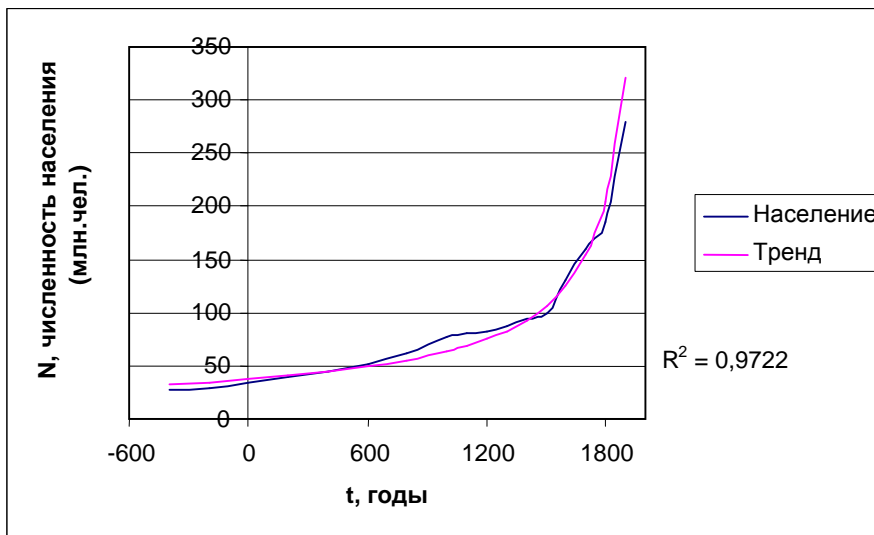


б) отклонения от тренда

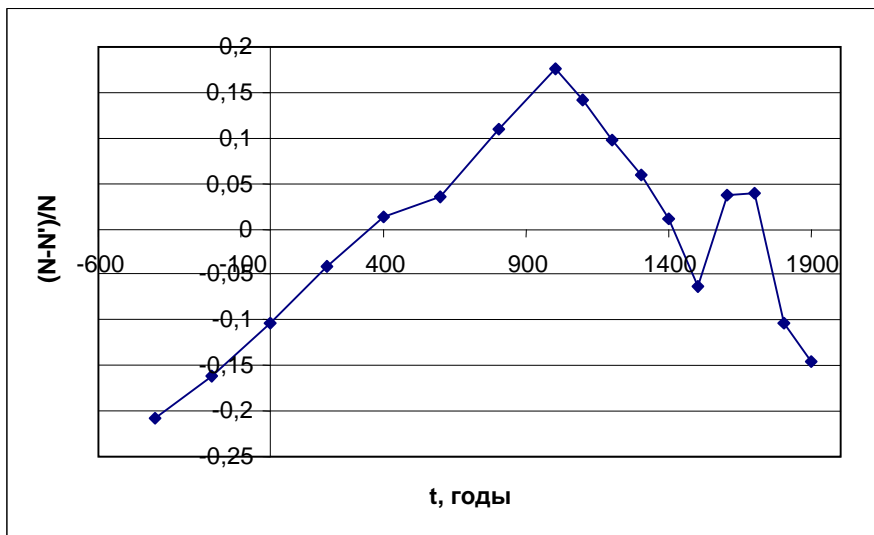


в) корреляция (коэффициент  $r = 0,45$ )

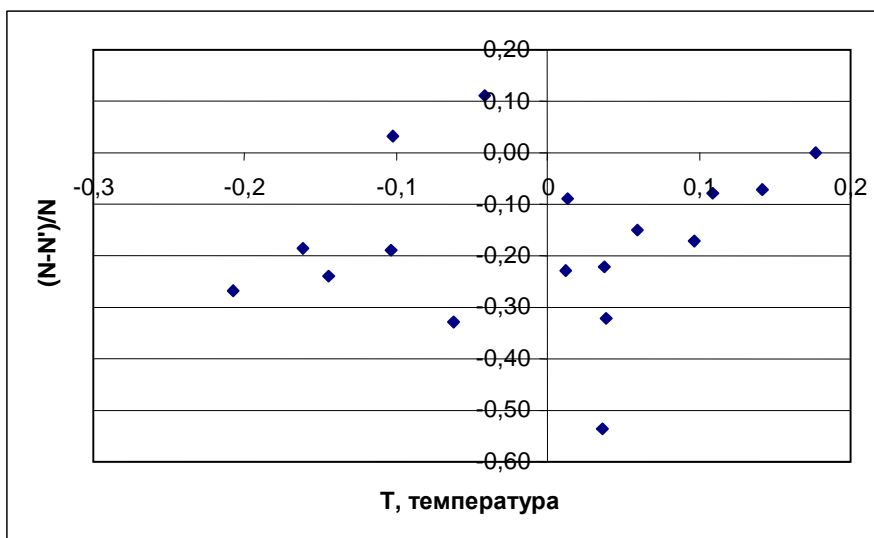
Рисунок 17 – Результаты расчетов для Китая



а) динамика численности населения



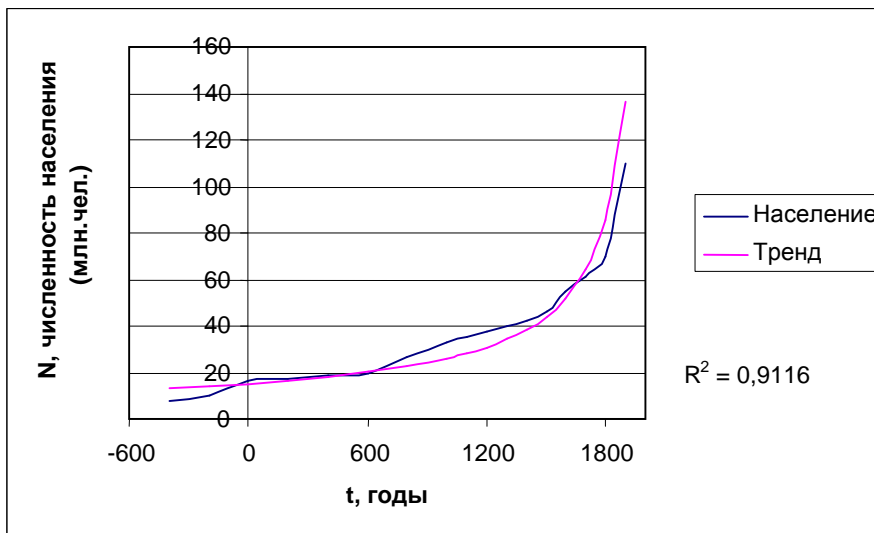
б) отклонения от тренда



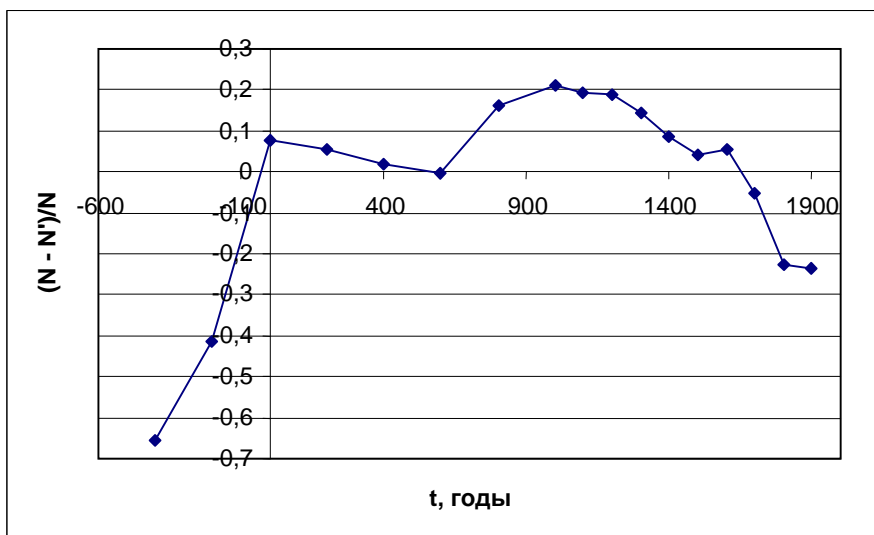
в) корреляция (коэффициент  $r = 0,17$ )

Рисунок 18 – Результаты расчетов для Индии

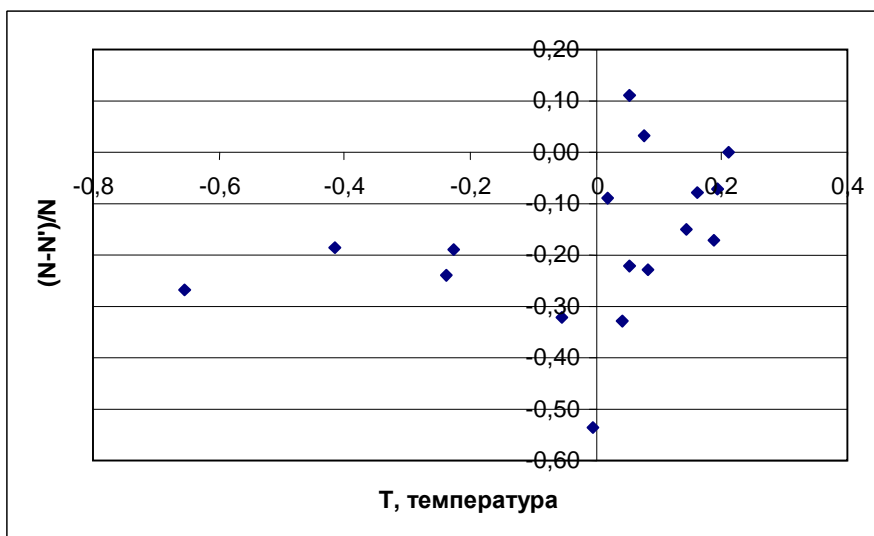




а) динамика численности населения



б) отклонения от тренда

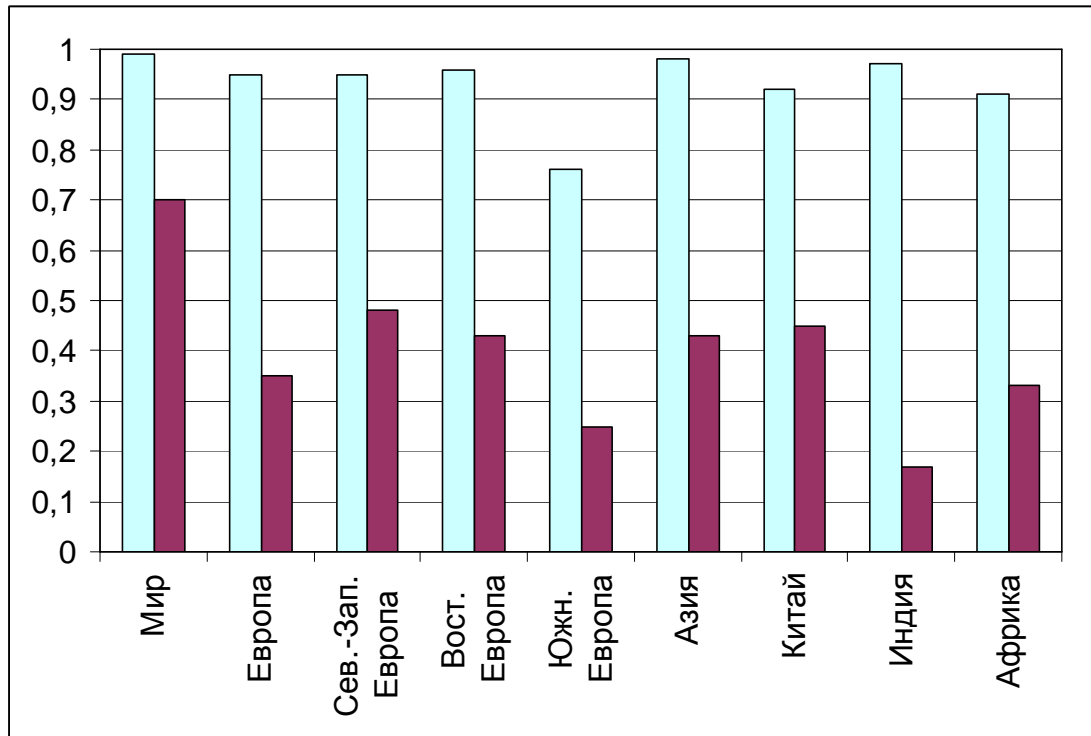


в) корреляция (коэффициент  $r = 0,33$ )

Рисунок 19 – Результаты расчетов для Африки в целом

## Анализ корреляции для мира и отдельных регионов

Обобщающие данные о значениях коэффициентов детерминации  $R^2$  и коэффициентов корреляции  $r$  для отдельных географических регионов и для мира в целом приведены на [рисунке 20](#).



**Рисунок 20** – Значения коэффициентов детерминации для аппроксимаций долговременных демографических трендов (светлые гистограммы) и коэффициентов корреляции между глобальными изменениями температуры и относительной численностью населения (темные гистограммы) для различных географических регионов и мира в целом

Видно, что очень высокие значения коэффициентов детерминации характерны для всех рассмотренных регионов мира, что указывает на правомерность аппроксимации долговременного демографического роста степенными функциями.

Еще более интересная информация следует из сравнительного анализа коэффициентов корреляции. Видно, что наибольшего значения корреляция между изменениями климата и численностью населения достигает для мира в целом, причем здесь можно говорить о высокой степени зависимости глобальных демографических процессов от климатических условий. При уменьшении географических размеров регионов степень этой зависимости снижается, что указывает на относительное повышение роли локальных политических и социально-экономических факторов в сравнении с факторами природно-климатическими. При этом, однако, обращает на себя внимание то, что коэффициент корреляции для Северо-Западной и Восточной Европы выше, чем для Европы в целом, а для Китая выше, чем для Азии.

Для объяснения этого факта обратимся к климатическому сравнению рассматриваемых регионов, используя в качестве основного показателя температуру. Распределение температуры на всем земном шаре можно представить с помощью карт изотерм. Изотермами называют линии, соединяющие на карте точки с одинаковой температурой воздуха в данный момент или в среднем за тот или иной промежуток времени. Для выявления локальных климатических особенностей удобно пользоваться изотермами среднемесячной температуры двух месяцев года: самого холодного и самого теплого (для северного полушария это, соответственно, январь и июль). Ниже приведен график изотерм января на территории Евразии.



Рисунок 21 – Изотермы января на территории Евразии в современный период

Если сопоставить географическое расположение изотерм января с корреляционными показателями в отдельности для каждого региона, то видно, что коэффициент корреляции  $r$  выше в тех регионах, через которые проходит нулевая изотерма января (то есть где средняя температура января близка к  $0^{\circ}\text{C}$ ). К этим регионам относятся Северо-Западная Европа, Восточная Европа, Китай. Данные регионы чувствительны к изменению средней температуры, особенно в зимний период, поскольку принципиально важным для жизнедеятельности является наличие или отсутствие устойчивых холодов в зимнее время.

К регионам, где коэффициент корреляции  $r$  сравнительно небольшой, относятся Индия, Южная Европа (Средиземноморье), Африка. Эти регионы объединяет то, что нулевая изотерма января через них не проходит. В этих регионах устойчивое тепло сохраняется круглый год и некоторое изменение средней температуры слабо сказывается на условиях жизни и на демографической ситуации.

## Основные выводы

- Демографическая динамика в крупных географических регионах и в мире в целом с хорошей точностью аппроксимируется возрастающим трендом степенного вида, отражающем улучшение технологий землепользования и увеличение демографической емкости территорий в ходе исторического развития. Локальные отклонения от тренда отражают влияние на численность населения различных социальных и климатических факторов.
- Корреляция между отклонениями численности народонаселения от тренда и средней глобальной температурой значима. При этом значимость корреляции тем выше, чем обширнее территория.
- Наиболее высокое значение корреляция имеет для территорий, где средняя температура января близка к нулю (Северо-Западная Европа, Восточная Европа, Китай). Это, по-видимому, обусловлено тем, что условия жизни на этих территориях в доиндустриальную эпоху в большей степени, чем в других регионах, зависели от изменения погодных факторов.

## Литература

1. Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. - М.: Мысль, 1988.
2. Клименко В.В. Климат и история в Средние века // Восток, 2003, №1, с.5-41.
3. Клименко В.В. Климат и история от Конфуция до Муххамада // Восток, 2000, №1, с.5-31.
4. Клименко В.В. Климат средневековой теплой эпохи в Северном полушарии. - М.: Издательство МЭИ, 2001.
5. Дмитриев М.Г., Третьяков Н.П. Введение в методы оптимизации и статистики. – М.: РГСУ, 2007.
6. Коротаев А.В., Малков А.С., Халтурина Д.А. Законы истории: Математическое моделирование развития Мир-системы. Демография, экономика, культура. / Отв. ред. Н.Н.Крадин. - М.: КомКнига, 2007.
7. Коротаев А.В. Долгосрочная политико-демографическая динамика Египта: циклы и тенденции. – М.: Восточная литература, 2006.
8. Нефедов С.А. О теории демографических циклов // Экономическая история, 2002, №8, с.116-121.
9. Turchin P. Historical Dynamics. Why States Rise and Fall. Princeton and Oxford, 2003.
10. Коротаев А.В., Комарова Н.Л., Халтурина Д.А. Законы истории: Вековые циклы и тысячелетние тренды. Демография, экономика, войны. / Отв. ред. Н.Н.Крадин. - М.: КомКнига, 2007.
11. С.Ю.Малков, Н.Б.Селунская, А.В.Сергеев Социально-экономические и демографические процессы в аграрном обществе как объект

математического моделирования // История и синергетика: Математическое моделирование социальной динамики. - М.: КомКнига, 2005, с.70-87.

12. Kremer M. Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990. // The Quarterly Journal of Economics, 1993, 108: 681-716.

13. Замков О.О., Толстопятенко А.В., Черемных Ю.Н. Математические методы в экономике: Учебник/Под общ. ред. д.э.н., проф. А.В. Сидоровича; МГУ им. М.В.Ломоносова. – 4-е изд., стереотип. – М.: Издательство «Дело и Сервис», 2004.

14. Капица С.П. Сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. Очерк теории роста человечества. - М., 1999.

15. McEvedy C., Jones R. Atlas of World Population History. New York: Facts on File, 1978.